

傾斜堤式管理型護岸の遮水シートに作用する波圧特性 およびその評価方法

伊 野 同*・鶴 飼 亮 行**・熊 谷 隆 宏***・前 野 詩 朗****

遮水シートによる遮水工を有する傾斜堤式の管理型護岸では、護岸を透過した波圧や処分場の内外水位差により生じる静水圧が、外力として遮水シートに作用する。これらの外力評価は、適切な押さえ材断面を設計する上で非常に重要であるが、特に波圧特性については研究成果も少なく、評価手法も十分に確立していない。そこで本研究では、傾斜堤式の管理型護岸を対象に水理模型実験を実施し、遮水シートに作用する波圧特性について調べた。また、数値波動水路および FEM 動的弾性地盤モデルによる数値解析により、遮水シートに作用する実験波圧を十分に再現できることを確認した。さらに、遮水シート作用波圧分布の簡易算定式の提案を行った。

1. はじめに

近年、廃棄物処分場の残余年数は逼迫した状況にあり、新規建設の必要性が高まっている。ここで、陸上における処分場の建設は、用地確保の段階で地元住民のコンセンサス取得が非常に困難な状況にあり、海面での処分場の新規建設が注目を集めている。

傾斜堤式の管理型護岸では、遮水シートによる遮水工が広く用いられ、その遮水シートには潮汐および波浪の影響が絶えず作用している。その主な外力としては、処分場内側の管理水位と潮位変動を有する外水位との内外水位差により生じる静水圧、および傾斜堤の堤体内および砂地盤内を伝播した波圧が挙げられる。これらの外力によって遮水シートが持ち上げられ、破損することを防止するため、遮水シートの上には外力よりも大きな荷重を有する押さえ材が設置される。押さえ材の荷重は、遮水機能の安定性・信頼性の観点からは重い程有利であるが、一方、廃棄物の処分容量を有効に確保する点では、その断面をできる限り小さくすることが望まれる。これより、押さえ材の断面を適切なボリューム・形状に設計するため、遮水シートに作用する外力を精度良く評価することが要求されている。しかしながら、現状では傾斜堤式管理型護岸の遮水シートへの作用波圧に関する研究はあまり無く、その評価手法も十分に確立されていない。

そこで本研究では、遮水シートに作用する波圧特性を明らかにすることを目的として、傾斜堤式の管理型護岸を対象に水理模型実験および数値解析を実施した。さらに、遮水シートに作用する波圧分布を簡易に評価できる算定式の提案を行った。

2. 水理模型実験の概要

高橋ら (1995) によると、混成堤式護岸のケーソン背

後に圧抜き口を設けると、裏込め内の圧力増加が抑制されることを示している。また、藤井ら (2002) は、混成堤式の管理型護岸を対象に水理模型実験を実施し、圧抜き口による遮水シートへの作用波圧の低減効果を確認した。圧抜き口の効果は、護岸形式が傾斜堤である場合も同様に期待され、遮水シートの押さえ材断面を小さくできるものと考えられる。そこで本研究は、図-1 に示す上部工の背後に圧抜き口を有する傾斜堤式の管理型護岸を標準断面 S-1 として、水理模型実験を実施した。表-1 に実験条件を示す。S1-1~19 は標準断面 S-1 の護岸を対象とした実験で、その中でも S1-1~9 が標準ケースとなる。一方、S1-10~15 は、護岸模型直下の地盤に相馬砂 7 号を厚さ 20 cm、水路方向に 12 m 敷いて行った実験で、砂地盤内の波圧の伝播特性を検討した。また、S1-16~19 は、潮位を H.W.L. から M.W.L. に変えたケースとなる。さらに、S2-1~4 および S3-1~4 は、護岸断面の違いによる遮水シート作用波圧への影響を検討したケースで、標準断面 S-1 を基準として、圧抜き口なしの断面 S-2、および図-1 の破線で示す堤体中心部を難透水性材料で置換した断面 S-3 をそれぞれ対象にしている。

表-1 実験条件

Case	護岸構造	水路床	現地スケール		
			波高 m	周期 s	水深 m
SI-1	S-1 (圧抜き口あり)	不透過	2.0	6.0	10.0 H.W.L.
SI-2				8.0	
SI-3				10.0	
SI-4			3.0	7.0	
SI-5				9.0	
SI-6				11.0	
SI-7		砂地盤 (透過)	3.5	7.5	10.0 H.W.L.
SI-8				9.5	
SI-9				11.5	
SI-10			2.5	6.5	
SI-11				8.5	
SI-12				10.5	
SI-13		3.5	2.5	7.5	
SI-14				9.5	
SI-15				11.5	
SI-16	S-2 (圧抜き口なし)	不透過	2.0	6.0	9.0 M.W.L.
SI-17				10.0	
SI-18				7.5	
SI-19			3.5	11.5	
S2-1				6.0	
S2-2				10.0	
S2-3	S-3 (圧抜き口あり) 難透水性材料 置換タイプ	不透過	2.0	7.5	10.0 H.W.L.
S2-4				11.5	
S3-1			3.5	6.0	
S3-2				10.0	
S3-3	S-3 (圧抜き口あり) 難透水性材料 置換タイプ	不透過	2.0	7.5	10.0 H.W.L.
S3-4				11.5	

* 正会員 工修 五洋建設(株)技術研究所
** 正会員 工修 五洋建設(株)技術研究所 課長
*** 正会員 Ph.D. 五洋建設(株)技術研究所 係長
**** 正会員 工博 岡山大学助教授 環境理工学部環境デザイン工学科

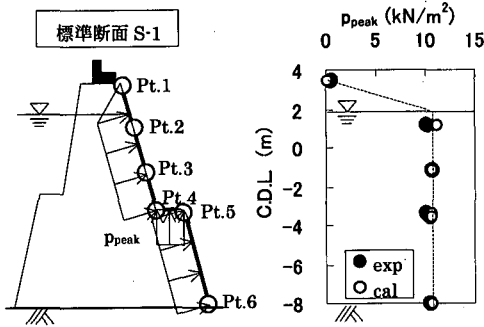
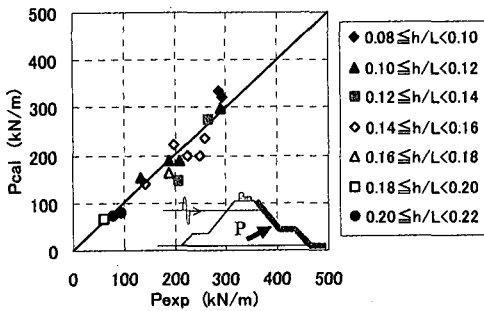
図-3 最大波圧の鉛直分布 ($H=3.0$ m, $T=9.0$ s, H.W.L.)

図-4 実験と解析の波圧合力の比較

解析で、傾斜堤法面部の遮水シートに作用する波圧を精度良く評価できることが確認された。

5. 傾斜堤法面部の遮水シート作用波圧算定式

ここでは、傾斜堤式管理型護岸の法面部における遮水シートを対象に、作用波圧分布に関する算定式を提案する。ただし本算定式は、圧抜き口のない護岸断面 S-2 の実験でみられた、上部工直下の空気が波浪の作用で密閉状態となった時に生じる衝撃的な波圧は考慮していない。

実験および数値解析結果をもとに、法面部の遮水シートに作用する波圧は、図-5 に示す静水面より上は三角形、静水面より下は一樣波圧 p_1 で分布し、遮水シートに対し垂直に作用するものとしてモデル化を行った。図中の h は前面水深であり、 h_c は静水面からの遮水シート上端の高さである。また、波圧の作用高さ η^* および前面波圧強度 p_1 の値は、谷本ら (1976) の消波ブロックで被覆された直立壁に作用する波力の算定式を準用し、次式 (1)~(3) で評価することとした。

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos \beta) \lambda_1 H_{\max} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$p_1 = 0.5(1 + \cos \beta) \lambda_1 \alpha_1 \omega_0 H_{\max} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left\{ \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

なお、式中の β は防波堤壁面に対する垂線と波の主流向とのなす角度、 $H_{\max}$ は最大波高、 ω_0 は水の単位体積重

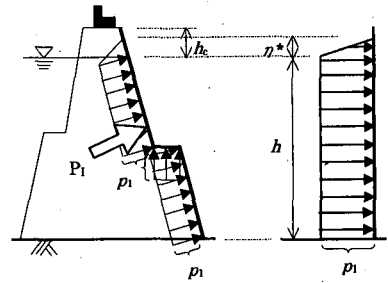
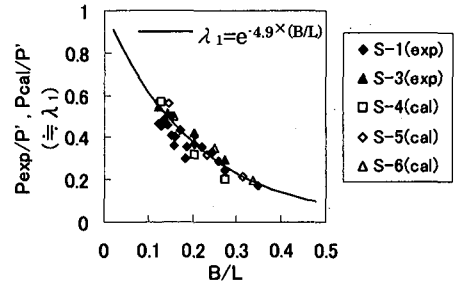


図-5 遮水シート作用波圧の分布モデル

図-6 波圧低減率 λ_1

量、 L は波長、そして λ_1 は波圧の低減率である。

算定式 (1)~(3) を用いて波圧を評価する場合、波圧低減率 λ_1 の値が重要となる。そこで、圧抜き口を有する断面 S-1 および S-3 に関する実験結果、および数値波動水路による追加解析結果をもとに、波圧低減率 λ_1 の値について検討を行った。追加解析は、実験が限られた護岸断面を対象としていることから実験データを補間する意味で実施したもので、図-1 に示す標準断面 S-1 を基準として、両側法面部の小段がない断面 S-4、護岸前面の法勾配を 1:1.5 から 1:2.0 に変えた断面 S-5、および護岸の堤体幅を標準断面 S-1 より 3.0 m 広げた断面 S-6 を対象としている。なお、追加解析におけるポーラス値 C_M 、 C_D および空隙率 n の値には、ケース S-1~S-3 と同じ値を用いた。

図-6 は、実験および数値解析から求めた傾斜堤法面部の遮水シートに作用する波圧合力 P_{exp} および P_{cal} を、波圧低減率 λ_1 を 1.0 として式 (1)~(3) より算出した波圧合力 P で除した値について、減衰距離 B/L との関係を示したものである。なお、 B は静水面位置における傾斜堤の堤体幅である。 P_{exp}/P および P_{cal}/P は、波圧低減率 λ_1 にほぼ相当するので、その値は減衰距離 B/L を用いて次式で近似することができる。

$$\lambda_1 = e^{-4.9 \times (B/L)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

図-7 は、算定式 (1)~(4) より得た傾斜堤法面部の遮水シート作用波圧分布をもとに算出した波圧合力 P_i と、水理模型実験および数値波動水路による解析結果よ

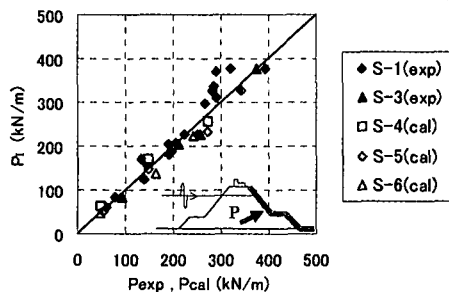


図-7 波圧算定式の精度

り算出した波圧合力 P_{exp} および P_{cal} を比較したものである。図-7 から、算定式 (1)～(4) より得た波圧合力 P_i は、実験および解析から求めた波圧合力 P_{exp} , P_{cal} と良く一致しており、本波圧算定式の妥当性を示唆する結果となっている。

ただし、本波圧算定式は、前述したように圧抜き口なしの実験で確認された衝撃的な波圧 (図-2) は考慮されていない。圧抜き口がない護岸断面において越波を生じる大きな波が作用する場合には、衝撃的な波圧が生じ、算定式 (1)～(4) で求めた波圧推定値よりも大きな波圧が遮水シートに作用する可能性があるので注意が必要である。これらの衝撃的な波圧の大きさは、波浪条件や護岸形状による影響が大きいものと考えられるので、水理模型実験により確認する必要がある。

6. 水平底面部の遮水シート作用波圧特性

これまで、傾斜堤式管理型護岸の法面部の遮水シートに作用する波圧について述べたが、砂地盤内を伝播した水圧が揚圧力として作用する護岸背後の水平底面部に敷設した遮水シートについても検討が必要である。なお、藤井ら (2002) の行った混成堤式の管理型護岸を対象とした水理模型実験によると、砂地盤内の波圧は急激な減衰を伴って伝播し、約 1/10 波長の距離でほぼ消散している。本実験では、護岸直下に厚さ 20 cm、水路方向に 12 m の砂層を設置した実験 (ケース S1-10～15) において、図-8 に示す pt. 7～9 の測定点で間隙水圧を計測し、護岸背後の水平底面部に敷設した遮水シートへの作用波圧特性を調べた。なお、実験で用いた砂は相馬珪砂 7 号で、中央粒径 D_{50} は 0.13 mm、透水係数 k は 3.4×10^{-3} cm/s である。

傾斜堤式護岸背後の水平底面部に敷設した遮水シートには、海底面に作用する波圧が砂層内を伝播することで生じる変動水圧 p_w 成分の他に、傾斜堤の堤体内における平均水位の上昇に伴って生じる静的な水圧 p_s が作用する。図-9 は、実験から得られた変動水圧 p_w の減衰特性である。図中の波圧 p_{wpeak} は、実験で計測された各測定

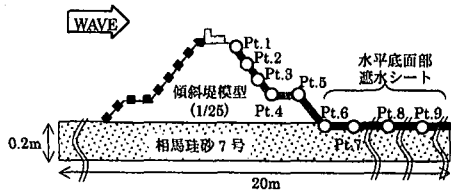
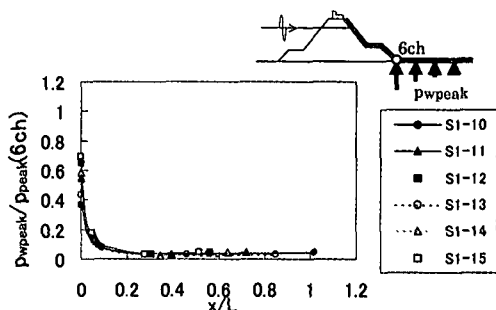
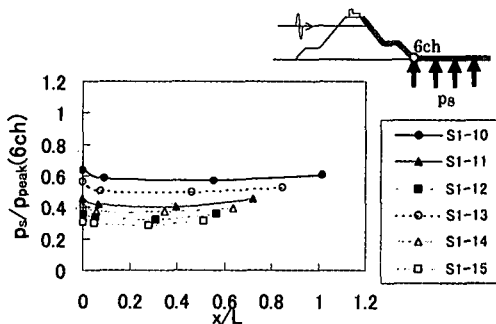


図-8 実験砂層および間隙水圧測定位置

図-9 変動水圧 p_w の減衰特性図-10 平均波圧 p_s の分布

点の最大波圧 p_{peak} 値から、平均水圧 p_s 値を差し引いた値で変動水圧 p_w の振幅を表し、傾斜堤法尻部の最大波圧 $p_{peak(6ch)}$ で無次元化している。藤井ら (2002) の実験同様、変動水圧 p_w は急激な減衰を伴って砂層内を伝播し、法尻から 1/10 波長程度の距離でほぼ消散しているのがわかる。

護岸に作用する波は、傾斜堤の捨石堤体内を透過する際に急激な減衰を伴うため、堤体内では平均水位が上昇する。図-10 は、実験における水平底面部の遮水シートに作用する平均水圧 p_s を法尻部の最大波圧 $p_{peak(6ch)}$ で無次元化した値である。これより、捨石堤体内での平均水位の上昇分に相当する水圧が、護岸背後の水平底面部の敷設した遮水シート全域にわたり作用しているのがわかる。

なお、本実験で計測された平均水圧 p_s 値は、現地スケールで 3.0～5.6 kN/m² 程度で、水位上昇量に換算す

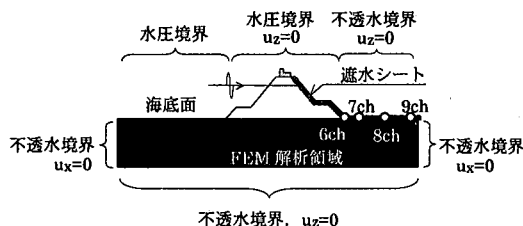


図-11 境界条件

ると30~56 cm程度と決して小さくないと考えられる。

以上の水平底面部の遮水シートに作用する波圧特性は、弾性砂層内の非定常浸透流問題として取り扱うことができる。そこで、名合・前野（1984）の重み付き残渣法の1つであるガラーキン法を用いた2次元FEM動的弾性地盤モデルを用いて、水平底面部の遮水シートに作用する波圧特性に関する実験の再現性について検討を行った。

なお、解析に用いた地盤の物性値は、砂層の透水係数 k は実験砂と同様の $3.4 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 、空気含有率 λ_a は0.003、間隙率 λ_w は0.4、水の圧縮率 β は $4.3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ 、土の圧縮率 E は $1.5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 、ポアソン比 ν には0.45を用いた。境界条件は、図-11に示すように海底面は水頭境界として取り扱い、先に述べた数値波動水路による解析で求めた水圧値を与えた。傾斜堤底面部も同じく水圧境界として、鉛直変位 u_z は0とした。また、遮水シートおよび砂層下面部は不透水境界として取り扱い、鉛直方向の変位 u_z を0とした。また、砂層の両側面は、不透水境界として取り扱い、水平方向の変位 u_x を0とした。

波浪作用の開始後、傾斜堤背後の水平底面部に敷設した遮水シートに作用する波圧波形が定常状態となった時の実験と解析結果を比較した。図-12に、波高3.5 m、周期7.5 s、H.W.L.の条件下における波圧波形の比較図を示す。数値波動水路と浸透流2次元FEMモデルを組み合わせた本解析手法における波圧波形は、実験波形と良く一致し、変動水圧 p_w 成分の砂層内の伝播過程における減衰や、傾斜堤の堤体内における平均水位の上昇に伴って生じる静的な水圧 p_s を良く説明している。

7. おわりに

本研究の主な結論について、以下にまとめる。

(1) 圧抜き口のない傾斜堤式管理型護岸に、上部工を越波する大きな波が作用すると、傾斜堤法面部に敷設した遮水シートに衝撃的な波圧が作用することを実験で確認した。これらの衝撃的な波圧の発生は、上部工背後に

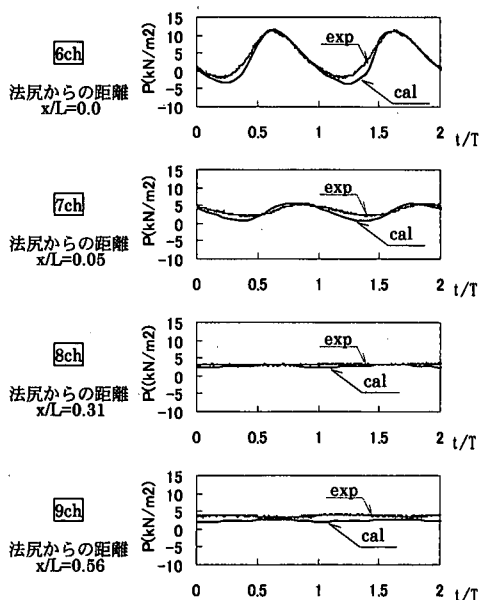


図-12 2次元FEMモデルの再現性

圧抜き口を設けることで抑制することができる。

(2) 傾斜堤法面部に敷設した遮水シートに作用する波圧を簡易に評価できる算定式を提案し、実験および数値解析結果との比較から、その再現性を確認した。

(3) 傾斜堤法面部および護岸背後の水平底面部に敷設した遮水シートに作用する波圧は、数値波動水路およびFEM動的弾性地盤モデルを用いた数値解析で評価できる。

ただし、圧抜き口がない護岸断面の場合の衝撃的な波圧の評価については、個別の検討が必要となる。

参考文献

- 磯部雅彦・高橋重雄・余 錫平・榊山 勉・藤間功司・川崎浩二・蔣 勤・秋山 実・大山洋志 (1999): 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究—VOF法基本プログラムの作成—, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 321-326.
- 榊山 勉・阿部宣行・鹿島遼一 (1990): ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 554-558.
- 高橋重雄・鈴木高二郎・徳淵克正・岡村知光・下迫健一郎・善 功企・山崎浩之 (1995): 護岸の吸い出しに関する水理模型実験, 港湾技術研究所報告, 第35巻2号, pp. 3-63.
- 谷本勝利・本 浩司・石塚修次・合田良美 (1976): 防波堤の設計波力算定式についての検討, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 11-16.
- 名合宏之・前野詩朗 (1984): 変動水圧作用下における砂地盤内の水圧分布特性, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 591-595.
- 藤井 敦・高橋重雄・小椋 進・宇野健司・杉山直子・五月女洋・伊野 同・鶴飼亮行・熊谷隆宏 (2002): 混成堤式管理型護岸の遮水シートに作用する波圧特性および波圧算定式に関する研究, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 826-830.